Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 5, Dec.-Jan. 2024, p. 555-573

Assessment of Useful Life of Negarestan Reservoir Dam Using Hypsometric Curve by Modified Strahler Method and Satellite Imagery

A. Zahiri[1*], Kh. Ghorbani[1], H. Feiz Abady[2], H. Sharifan[1]

1 and 2- Associated Professor and Ph.D Student, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: zahiri@gau.ac.ir)

Received: 31-08-2024 Revised: 28-10-2024 Accepted: 02-11-2024 Available Online: 02-11-2024	**How to cite this article:** Zahiri, A., Feiz Abady, H., Ghorbani, Kh., & Sharifan, H. (2024). Assessment of useful life of Negarestan reservoir dam using hypsometric curve by modified Strahler method and satellite imagery. *Journal of Water and Soil, 38*(5), 555-573. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89646.1432

Introduction

Reservoirs are crucial for water supply to human societies, making their proper and planned management essential. Dams serve multiple purposes, including urban water supply, agricultural irrigation, flood control, and hydroelectric power generation. In order to properly manage and monitor the consumption of these important reserves, it is inevitable to know their capacities. Using water stage and the reservoir's initial volume-area-elevation curve, which is prepared with the hydrographic operations, is a common method for estimating the storage capacity of reservoirs at different water levels. Over time, the occurrence of numerous sedimentations, often due to factors such as floods, can alter the initial volume-area-elevation curve of a reservoir, requiring it to be updated. Hydrographic operations, using tools like eco-sounders, are conventional methods for updating this curve; however, these methods are both expensive and time-consuming. In recent years, various studies have focused on remote sensing techniques aimed at estimating the volume of water stored in reservoirs, using water levels to establish the surface area-elevation curve. The basis of these studies is the separation of water-land masks using spectral indices, the calculation of water levels, and the development of reservoir surface area-elevation curves through linear or polynomial relationships. However, the main limitation of these methods is the inaccuracy of linear or polynomial relationships in fitting the surface area-elevation curves at the beginning and end points of the water stage change interval, which correspond to the empty or full states of the reservoir. This inaccuracy arises due to factors such as drought or flood events. In this research, the limitation of linear and polynomial relationships in accurately predicting the points of the reservoir surface area-elevation curves, where observational data are unavailable due to non-occurrence, was addressed by using the Modified Strahler method to draw the hypsometric curve. This method allows for the calculation of the storage capacity of the reservoir between successive water levels and the determination of the final volume of water stored in the reservoir. By comparing the volumes of water stored at the present and initial reservoir capacities, the sedimentation rate and the useful life of the Negarestan Dam reservoir were estimated.

Material and Methods

Negarestan Dam (Kabudval) is located on the Qarasu (Zarin Gol) river, 45 km east of Gorgan in the Golestan Province. This dam is used for purposes such as supplying urban water to Aliabad city and supplying water needed for the agricultural irrigation network of Qarasu. In this study, landsat8 satellite images were used to estimate the useful life of the Negarestan reservoir. The required images of the ROI were downloaded through the USGS database and pre-processed in Envi5.3 software. Using visible and infrared spectral bands, water indices NDWIMCFeeters, NDWIGao, MNDWI, AWEISh and TCWet were calculated to separate land-water masks. After evaluating the accuracy of the obtained water level results by comparing it with the initial volume-area-elevation curve of Negarestan reservoir, the MNDWI index was used as the most accurate index to calculate water levels. In this study,

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89646.1432

the modified Strahler method was used to obtain the hypsometric curve of the surface area-elevation of the reservoir, which has high accuracy in extrapolating the beginning and end points of the curve. By using the hypsometric curve, water levels were extracted for arbitrary water levels, and with the help of the prismoidal method, the volume between consecutive water levels was calculated. The sum of these volumes equaled the current storage capacity of the reservoir. To estimate the sedimentation rate of the Negarestan Dam reservoir, the current storage capacity was compared with the initial storage capacity in 2015. Based on this comparison, the useful life of the reservoir was accurately predicted.

Results and Discussion

Validation results for calculating water surface areas using NDWIMCFeeters, NDWIGao, MNDWI, AWEISh and TCWet water indices showed that the MNDWI index with an average water surface areas calculation error equal to 5% is more accurate than other indices. Therefore, the MNDWI index was used in this study. Additionally, the comparison of the volume of water stored in the Negarestan reservoir with its initial storage capacity at the time of operation revealed that, over a period of 9 years, the storage capacity of the reservoir (at a water level of approximately 189.5 meters), which is close to the overflow crest level, had significantly decreased. It has decreased from about 24 to 20 million cubic meters, based on which the average annual sedimentation rate of the reservoir was estimated, to about 1.6%. The results showed that in a period of 9 years, the average level of the bathymetry of Negarestan reservoir has increased by 10 meters due to the accumulation of sediments, and the minimum level of the batymetry has reached from 160 to about 170 meters. According to the statistics of the International Commission on Large Reservoirs (ICOLD), the average annual sedimentation rate of the world's reservoirs is reported to be about 0.95%, and the results show that this amount in the Nagaristan Dam reservoir is almost 2 times the average rate. It is universal. According to the results obtained from this research and assuming constant climatic conditions, the useful life of the Nagarestan dam reservoir was estimated to be about 53 years from the beginning of 2024.

Conclusion

Considering the increasing importance of water resources management, including dam reservoirs, this study employed a fast and cost-effective method based on remote sensing to calculate the volume of water stored in dam reservoirs and estimate their useful life. In addition to providing appropriate accuracy, this method was able to overcome the limitations of previous approaches in estimating the volume of accumulated sediment in the deeper parts of the reservoir. As a result, it offers a reliable tool for the effective management of water resources.

Keywords: Dam reservoir, Landsat8, Remote sensing, Sedimentation rate, Storage capacity

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۸ شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۳، ۵۷۳-۵۵۵

برآورد عمر مفید مخزن سد نگارستان با ترسیم منحنی هیپسومتریک به‌روش Strahler اصلاح‌شده و تصاویر ماهواره‌ای

عبدالرضا ظهیری[۱*]- خلیل قربانی[۱]- حامد فیض‌آبادی[۲]- حسین شریفان[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

چکیده

مخازن سدها از منابع حیاتی تأمین‌آب جوامع بشری محسوب می‌شوند که آگاهی‌داشتن از مقدار حجم آب ذخیره‌شده در آن‌ها امری ضروری است. استفاده از اشل و منحنی حجم–سطح–ارتفاع مخزن که به‌کمک عملیات نقشه‌برداری تهیه می‌شود، روش معمول برای تخمین ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن می‌باشد. با گذشت‌زمان و وقوع رسوب‌گذاری‌های متعدد، منحنی حجم–سطح–ارتفاع مخزن تغییر می‌کند که استفاده مجدد از آن نیازمند تصحیح این منحنی است. عملیات هیدروگرافی مخازن بااستفاده از ابزاری مثل اکوساندر روشی مرسوم برای تصحیح این منحنی‌است که علاوه بر پرهزینه بودن، زمان‌بر نیز می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی برمبنای سنجش‌ازدور با هدف تخمین حجم آب‌ذخیره‌شده در مخازن، به‌محاسبه سطوح آب برای ترسیم منحنی حجم–سطح–ارتفاع پرداخته‌اند. اساس کار این مطالعات تفکیک پهنه‌های آب‌وخشکی به‌کمک شاخص‌های طیفی، محاسبه سطوح‌آب و ترسیم منحنی‌های سطح–ارتفاع مخازن بااستفاده از روابط خطی یا چندجمله‌ای‌ها می‌باشند. محدودیت این روش‌ها عدم‌دقت مناسب روابط خطی یا چندجمله‌ای در برازش منحنی سطح–ارتفاع مخزن برای نقاط ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات عمق‌آب است. در این پژوهش با هدف رفع‌محدودیت روابط خطی و چندجمله‌ای برای پیش‌بینی دقیق نقاطی از منحنی سطح–ارتفاع مخزن که داده‌های مشاهداتی به‌دلیل عدم وقوع موجود نیستند، از ترسیم منحنی هیپسومتریک به‌روش استرالر اصلاح‌شده استفاده شده است. بااستفاده از منحنی هیپسومتریک می‌توان ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن بین سطوح‌آب متوالی را محاسبه کرد و حجم‌نهایی آب ذخیره‌شده در آن‌را به‌دست آورد. براین اساس با مقایسه حجم آب ذخیره‌شده در زمان فعلی و ظرفیت ذخیره‌سازی طراحی‌مخزن در زمان شروع بهره‌برداری، نرخ رسوب‌گذاری و عمر مفید مخزن سد نگارستان برآورد شد. نتایج نشان‌داد که در بازه‌زمانی ۹ ساله، ظرفیت ذخیره مخزن در تراز سطح آب حدود ۱۸۹/۵ متر که معادل تراز تقریبی تاج سرریز می‌باشد، از حدود ۲۴ به ۲۰ میلیون‌متر مکعب کاهش یافته‌است که براین اساس نرخ متوسط رسوبگذاری سالانه مخزن حدود ۱/۶ درصد برآورد شد. همچنین در این‌مدت، تراز کف مخزن سد نگارستان به‌دلیل انباشته‌شدن رسوبات به‌طور متوسط حدود ۱۰ متر افزایش داشته است و کمترین تراز کف‌مخزن از ۱۶۰ به حدود ۱۷۰ متر رسیده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش و با فرض ثابت بودن شرایط اقلیمی، عمرمفید مخزن سد نگارستان از ابتدای سال ۱۴۰۳ حدود ۵۳ سال برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور، ظرفیت‌ذخیره، لندست ۸، مخزن سد، نرخ رسوب‌گذاری

مقدمه

سدها یکی از پروژه‌های مدیریت و حفاظت از منابع آب می‌باشند که برای کنترل سیلاب، تأمین آب شرب، تولید انرژی برق‌آبی و آبیاری اراضی کشاورزی استفاده می‌شوند. بیش از ۲/۸ میلیون سد متوسط و بزرگ در دنیا وجود دارد که رژیم‌های جریان رودخانه‌ها و نحوه انشعاب آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و باعث جلوگیری از مهاجرت موجودات آبزی مثل ماهی‌ها، تله‌اندازی رسوبات و همچنین تغییر شدید مورفولوژی رودخانه در بازه‌های بالادست و پایین‌دست شده‌اند (Kondolf & Yi, 2022). مخازن سدها از سیستم‌های پیچیده رسوبی به‌شمار می‌آیند که موانعی را برای انتقال طبیعی رسوبات رودخانه‌ها ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، رسوب‌گذاری در

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: zahiri@gau.ac.ir)

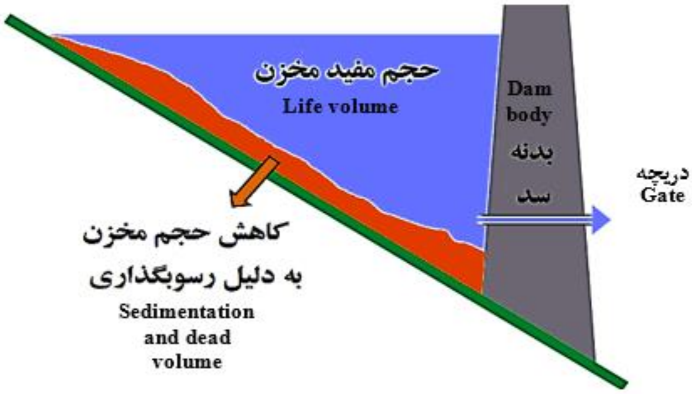
https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89646.1432

مخازن باعث ایجاد مشکلات جدی در مدیریت عملیاتی آن‌ها می‌شود (شکل ۱) که علت اصلی آن تجمع تدریجی بار رسوبی حمل‌شده توسط رودخانه‌ها است (Ren *et al*., 2021).

با توجه به‌تنوع گسترده شکل کف مخازن، تغییرات دبی رودخانه‌ها، مقدار و نوع رسوبات حمل‌شده و تغییرات ظرفیت ذخیره آب مخازن، ارائه مدل‌های رسوب‌گذاری در مخازن کاری دشوار و هزینه‌بر است (Sedlacek *et al*., 2022). اهمیت تخمین حجم رسوب‌گذاری مخازن سدها باعث استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مختلفی شده‌است که باتوجه به شرایطی مثل دسترسی به داده‌ها، هدف اندازه‌گیری، بودجه و زمان در دسترس، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Gonzalez *et al*., 2023). اندازه‌گیری توپوگرافی کف مخزن با استفاده از سیگنال‌های صوتی و فناوری‌های مکان‌یابی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تعیین حجم رسوب انباشته‌شده است (Banasik *et al*., 2021). گاه‌شماری یکی دیگر از تکنیک‌های معمولی برای اندازه‌گیری نرخ رسوب‌گذاری در بازه‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰ساله است (Chen *et al*., 2020). علاوه بر این می‌توان با توجه به نوع،کیفیت و فراوانی داده‌های موجود هیدرولوژیکی از مدل‌ها و روابط ریاضی برای تخمین نرخ رسوب‌گذاری مخازن سدها استفاده کرد (Lemma *et al*., 2024). روش‌های مرسوم برای تعیین حجم رسوب‌گذاری در مخازن سدها به‌صرف زمان و تأمین منابع مالی کافی نیاز دارند که این امر در شرایط اقتصادی کنونی و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مثل ایران می‌تواند باعث کاهش میزان اندازه‌گیری‌های میدانی شود. در سال‌های اخیر ماهواره‌های بسیاری با سنجنده‌های کیفی پیشرفته برای تصویربرداری از پدیده‌های زمینی در مدار خود قرار گرفته‌اند که این امر باعث شده تصویربرداری ماهواره‌ای و استفاده از فناوری سنجش‌ازدور برای بررسی سری‌های زمانی تغییرات هیدرولوژیکی آب‌های سطحی از جمله تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخازن و دریاچه‌ها، تعیین مساحت گستره‌های آبی و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها مورد توجه قرار گیرد (Droujko *et al*., 2023). مزیت اصلی تصویربرداری ماهواره‌ای نسبت به روش‌های مرسوم اندازه‌گیری هیدروگرافی مخازن، علاوه بر هزینه بسیار کم غلبه‌بر دشواری‌های جمع‌آوری، انتقال و به‌اشتراک‌گذاری حجم بالایی از داده‌های عمق‌سنجی حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی می‌باشد (Wagh & Manekar, 2021).

جورجولتیس و همکاران (Gourgouletis *et al*., 2022) به‌منظور تخمین تراز سطح آب، مساحت گستره آبی و نیز تغییرات حجم آب در مخازن سدها، روش جدیدی را بر مبنای مشاهدات درمحل و قابلیت داده‌های سنجش‌ازدور توسعه دادند. آنها این روش را در مخزن Yliki کشور یونان با استفاده از شاخص NDWI (Normalized difference water index) و تصاویر ماهواره Sentinel2 ارزیابی کردند که مطابق نتایج، خطای این روش در محاسبه تغییرات حجم آب مخزن ۳/۸۶ درصد گزارش شد. تسفایه و همکاران (Tesfaye *et al*., 2022) به‌کمک سنجش از دور و نرم‌افزار GIS به‌مطالعه تغییرات دینامیکی آب ذخیره شده در مخازن سدهای کوگا[1]، شینا[2] و سلمکو[3] واقع در حوضه آبریز نیل آبی کشور اتیوپی پرداختند. برای این‌منظور آن‌ها با پیش‌پردازش تصاویر ماهواره Landsat8 و شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیکسل‌های آب، تغییرات ظرفیت ذخیره مخازن مورد مطالعه را به‌کمک شاخص (NDWI) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ نشان داد که ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن کوگا از ۸۳/۱۰ میلیون متر مکعب به ۸۱/۱۷ میلیون متر مکعب کاهش یافته است که نرخ رسوب‌گذاری سالانه آن ۰/۳۳ درصد به‌دست آمد. یولیانتو و همکاران (Yulianto *et al*., 2022) با استفاده از داده‌های ماهواره Landsat8 و پلتفرم (Google Earth Engine) GEE روش بهبودیافته‌ای برای استخراج خودکار مناطق آب و خشکی با استفاده از شاخص AWEI ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش SBA در دریاچه توبا واقع در استان سوماترای کشور اندونزی به یک آستانه تشخیص خودکار مناطق آبی رسیدند. آستانه محاسبه‌شده برای شاخص AWEI با روش SBA برابر ۰/۲۳- و دقت ۹۹/۴ درصد و آستانه نرمال برای شاخص AWEI برابر با ۰/۰۰ با دقت ۹۷/۴ درصد گزارش شد که نتایج بدست آمده ۲ درصد بهبود دقت در محاسبات را نشان داد. قنبری و همکاران (Ghanbari *et al*., 2024) در کشور ایران با استفاده از ماهواره‌های Sentinel2 و Sentinel3 و معادله هرون به بررسی تغییرات تراز سطح آب، مساحت سطح آب و تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد درودزن شیراز پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده محاسبه مساحت سطح آب، مقدار RMSE نسبی ۵/۳۹ درصد و همبستگی مساحت‌های محاسبه شده ۹۷/۳۰ درصد گزارش شد. با ارزیابی نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، همبستگی بین تغییرات تراز سطح و حجم آب ۹۸/۸۶ درصد، همبستگی بین تغییرات مساحت سطح و حجم آب ۸۴/۹۷ درصد و همبستگی بین تراز سطح و مساحت سطح آب ۸۷/۲۳ درصد برآورد شد. یائو و همکاران (Yao *et al*., 2023) برای محاسبه نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها، هشت سد را به‌عنوان منطقه مطالعاتی در ایالات‌متحده آمریکا انتخاب کرده و با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel2 مساحت پهنه آب را به ازاء تمام ترازهای سطح آب در محدوده حداکثر و حداقل برآورد نمودند.

1- Koga
2- Shina
3- Selamko



شکل ۱- انباشته‌شدن تدریجی رسوبات در کف مخزن.

Figure 1. Gradual sedimentation in reservoir.

سپس با انتگرال‌گیری از مساحت‌های به‌دست آمده بین دو تراز سطح آب، حجم ذخیره آب را محاسبه نمودند. آن‌ها با مقایسه حجم ذخیره به‌دست آمده نسبت به حجم اولیه مخزن در زمان بهره‌برداری برای یک تراز ثابت، به سرعت رسوب‌گذاری با میزان خطای ۰/۰۵ درصد در سال دست‌یافتند.

مطالعات گذشته بااستفاده از منحنی‌های خطی و چندجمله‌ای توانی به محاسبه منحنی سطح-ارتفاع مخزن پرداخته‌اند که باعث می‌شود در ترازهای سطح آب نزدیک به کف‌مخزن و یا در ترازهای نزدیک به تاج‌سرریز که مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی به‌علت عدم وقوع وجود ندارند، برازش منحنی سطح-ارتفاع مخزن با خطای نسبی زیادی در برون‌یابی همراه باشد و دقت در نتایج تخمین ظرفیت ذخیره مخزن کاهش یابد. در این پژوهش به‌کمک تصاویر ماهواره Landsat8 OLI از روش جدید استرالر اصلاح‌شده[1] برای ترسیم منحنی هیپسومتریک سطح-ارتفاع مخزن با هدف برآورد دقیق ظرفیت ذخیره‌سازی و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در آن استفاده شده‌است. روش ارائه‌شده می‌تواند خطای مطالعات قبلی را با ترسیم چندمنحنی هیپسومتریک برای مخزن بااستفاده از داده‌های کالیبراسیون ثابت و انتخاب منحنی سطح-ارتفاع بهینه کاهش دهد و با محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن در زمان فعلی و مقایسه آن با زمان شروع بهره‌برداری (شکل ۲)، حجم و نرخ رسوب‌گذاری و همچنین عمر مفید مخزن را پیش‌بینی کند. برای این منظور مخزن سد نگارستان در استان گلستان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

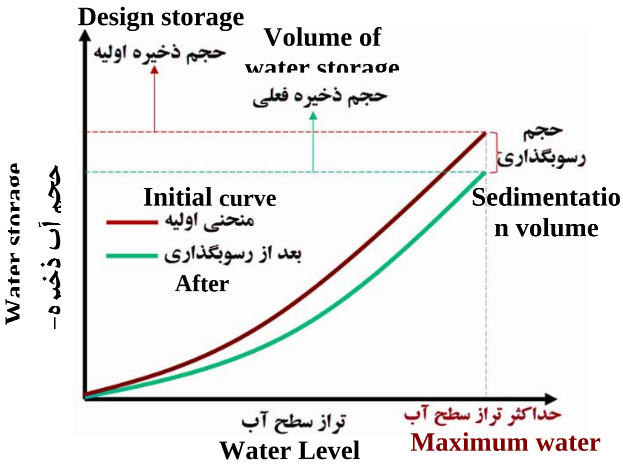
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد نگارستان

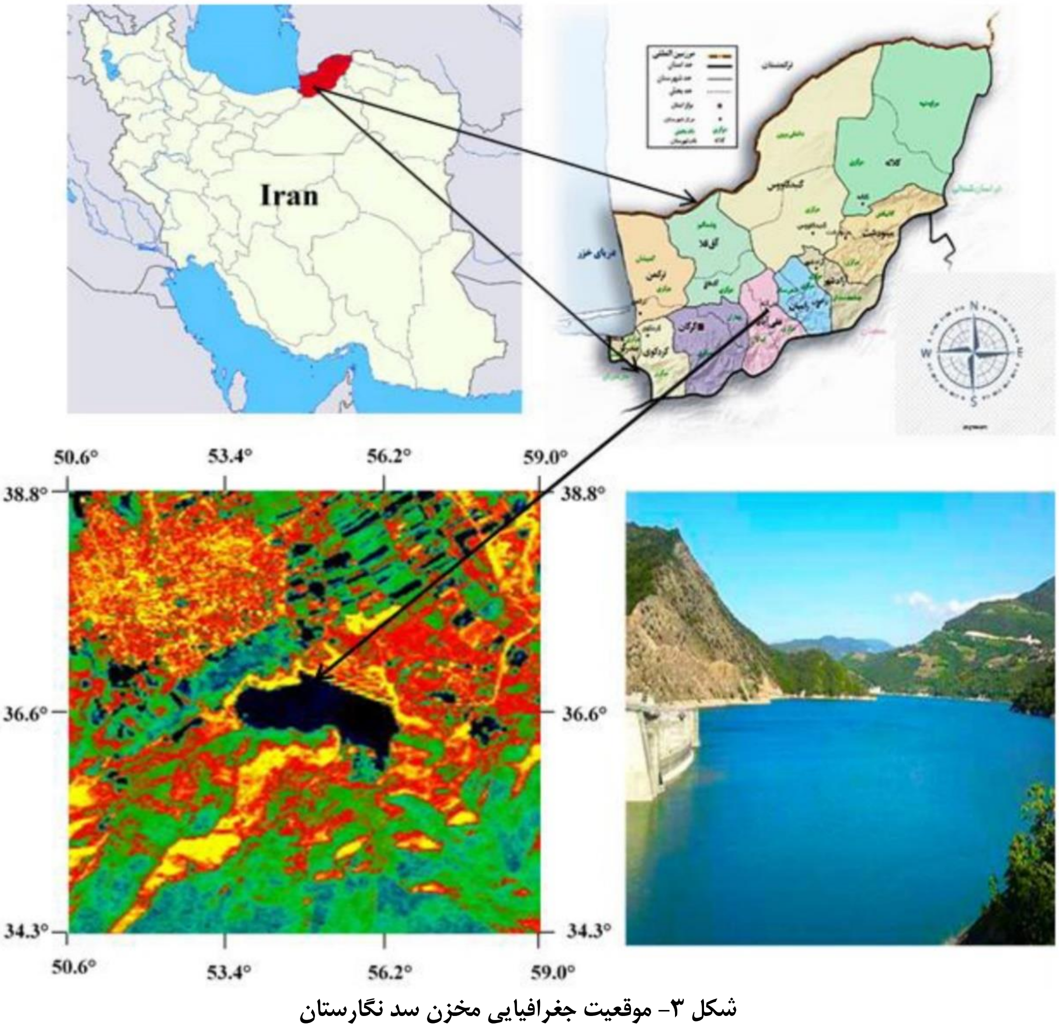
سد نگارستان (کبودوال) با طول جغرافیایی ″۱۵ ′۵۳ °۵۴ شرقی و عرض جغرافیایی ″۴۹ ′۵۳ °۳۶ شمالی بر روی رودخانه قره‌سو (زرین‌گل) و در کنار جنگل کبودوال در نزدیکی شهر علی‌آباد کتول و در ۴۵ کیلومتری شرق شهر گرگان در استان گلستان قرار دارد. این سد یکی از چهار سد مخزنی مهم استان گلستان می‌باشد. سد نگارستان از نوع خاکی همگن و در سال ۱۳۹۳ با ارتفاع حداکثر ۳۳ متر از پی، طول تاج ۱۳۷۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر، عرض سرریز ۵ متر و حجم مفید ۲۳/۲۰ میلیون متر مکعب در تراز سطح آب ۱۸۹ متر بهره‌برداری شد. آب سد نگارستان از دو منبع رودخانه زرین‌گل و آبشار کبودوال تأمین می‌شود. این سد برای اهدافی مثل تأمین آب شرب شهرستان علی‌آباد، تأمین آب مورد نیاز برای شبکه آبیاری کشاورزی قره‌سو و گردشگری احداث شده است. شکل ۳ موقعیت جغرافیایی مخزن سد نگارستان را نشان داده است.

1- Modified Strahler



شکل ۲- تغییر منحنی اولیه حجم-ارتفاع مخزن بر اثر رسوب-

Figure 2. Change of initial volume-water level curve of reservoir due to



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی مخزن سد نگارستان

Figure 3- Geographical location of Negarestan reservoir dam

تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره Landsat8 با قدرت تفکیک مکانی۳۰ متر و تفکیک زمانی ثبت تصاویر در هر ۱۶ روز یک‌بار در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ وارد مدار فضایی خود شد. این ماهواره شامل تصویرساز عملیاتی OLI و سنسور مادون‌قرمز حرارتی TIRS می‌باشد (Sekertekin *et al*., 2018). تصاویر ماهواره Landsat8 شامل مجموعه‌ای از باندهای مرئی، مادون قرمز، سیروس، پانکروماتیک و حرارتی می‌باشند که دسترسی به آن‌ها به‌صورت رایگان در آرشیو سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده[1] (USGS) قرار دارد. در این پژوهش از تصاویر Level2 Collection2 این ماهواره که به‌صورت پیش فرض مورد تصحیحات اتمسفری قرار گرفته‌اند استفاده شده است (Teixeira Pinto *et al*., 2020).

داده‌های مخزن سد

برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج روش پیشنهادی ارائه‌شده، از منحنی حجم–سطح–ارتفاع اولیه مخزن سد نگارستان که در سال ۱۳۹۳ با استفاده از عملیات نقشه‌برداری کف مخزن توسط اداره آب‌منطقه‌ای استان گلستان تهیه و تنظیم شده است و همچنین ترازهای سطح آب روزانه ثبت‌شده به کمک اشل استفاده شد. در شکل ۴ منحنی حجم–سطح–ارتفاع اولیه سد نگارستان نشان داده شده است.

پایگاه داده

کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ[2] (ICOLD) مجموعه‌ای از اطلاعات و داده‌های مربوط به مخازن با ظرفیت بیش از سه میلیون مترمکعب را در سراسر جهان گردآوری کرده است. این مؤسسه در سال ۱۹۲۸ تأسیس شد و هم‌اکنون دارای ۳۷ کمیسیون فنی با مشارکت حدود ده‌هزار نفر عضو از بیش از ۱۰۰ کشور دنیا است که در زمینه مدیریت و توسعه منابع آب فعالیت می‌کند. در این پژوهش برای مقایسه نرخ رسوب‌گذاری مخزن سد نگارستان با مخازن نقاط مختلف جهان از نمودار تهیه‌شده توسط (ICOLD) که میانگین نرخ رسوب‌گذاری سالانه برخی کشورهای دنیا را نشان می‌دهد استفاده شده است (شکل ۵).

ترسیم منحنی هیپسومتری به‌کمک داده‌های سطح–ارتفاع و روش استرالر اصلاح‌شده

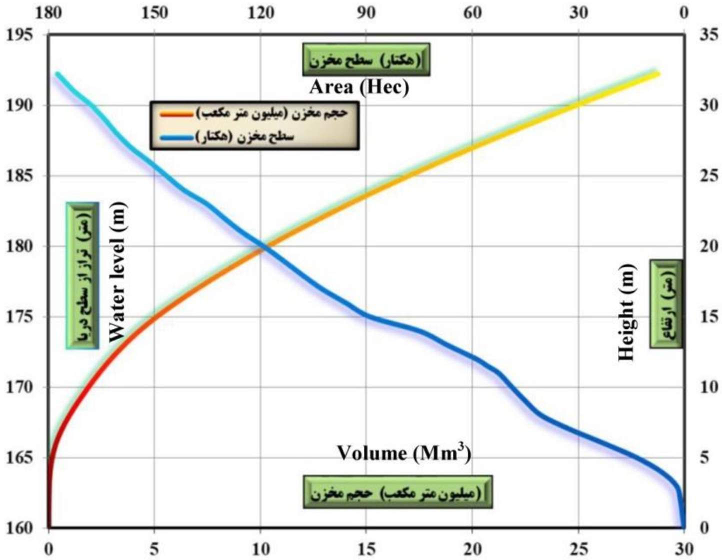
سنجنده‌های سنجش‌ازدور از نظر منبع انرژی به دو دسته تقسیم می‌گردند. دسته اول خود منبع انرژی هستند که به آن‌ها سنجنده فعال می‌گویند و به سه دسته رادار، لیدار و سونار تقسیم می‌شوند. دسته دوم سنجنده‌های غیرفعال هستند که منبع انرژی آنها نور خورشید بوده و به دو دسته نوری و حرارتی تقسیم می‌گردند. در این مطالعه از تصاویر نوری استفاده شده‌است که شامل طیف‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز میانی می‌باشند. روش تفکیک و استخراج مناطق آب‌و خشکی به‌کمک سنجش‌ازدور مبتنی بر ایجاد یک آستانه تشخیص ناشی از تفاوت در بازتابش نور از سطح پدیده‌ها، یکی از پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود. برای ترسیم منحنی سطح–ارتفاع مخزن سد نگارستان تصاویر مورد مطالعه ماهواره Landsat8 OLI در بازه زمانی ۱۴۰۲–۱۳۹۹ به‌شکلی که تغییرات تراز سطح آب مخزن بین کم‌ترین و بیش‌ترین تراز مشاهداتی بیشینه شود و همچنین فواصل بین این ترازها دارای توزیع مناسبی در بازه تغییرات عمق آب باشند، دانلود شدند. پس از پیش‌پردازش رادیومتریکی، باندهای‌طیفی مرئی و مادون‌قرمز مربوط به‌هر تصویر استخراج و به‌کمک این باندها پنج شاخص‌طیفی آبی برای تعیین آستانه نهایی بین مناطق آب‌وخشکی در نرم‌افزار Envi5.3 محاسبه شد. با ترکیب این پنج شاخص و تفکیک مناطق آب‌وخشکی می‌توان مساحت گستره‌های آبی را برای مناطق ابری، برفی و سایه‌دار شهری و غیرشهری با دقت بسیار بالا محاسبه کرد (Feiz abady *et al*., 2024). در سال‌های گذشته شاخص‌های آبی بسیاری برای تشخیص پیکره‌های آبی معرفی شده‌اند اما هیچ شاخص قطعی و بهینه‌ای برای استفاده در تمام مناطق جغرافیایی وجود ندارد. برای مثال در نزدیکی سواحل شاخص‌های آبی حساسیت متفاوتی را نشان می‌دهند. برای استفاده از خصوصیات شاخص‌های مختلف در این پژوهش، پنج شاخص‌آبی در مخزن سد نگارستان مورد ارزیابی قرار گرفتند که به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند :

- شاخص آب تفاضلی نرمال‌شده ($NDWI_{McFeeters}$).
- شاخص آب تفاضلی نرمال شده ($NDWI_{Gao}$).
- شاخص اصلاح شده آب تفاضلی نرمال‌شده (MNDWI).
- شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق سایه‌دار ($AWEI_{sh}$).
- شاخص Tasseled Cap for Wetness (TC_{wet}).

شاخص $NDWI_{MCFeeters}$ در سال ۱۹۹۶ برای شناسایی و نظارت بر تغییرات آب درون پهنه‌های آبی مثل دریاچه‌های کوچک‌وبزرگ و مخازن ارائه شد. شاخص NDWI به‌خوبی نمی‌تواند برخی پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای مثل خاک تیره، مناطق با پوشش‌گیاهی کم، سایه‌ها و غیره را حذف کند و ممکن است مساحت پهنه‌های‌آبی را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند (MCFeeters., 1996).

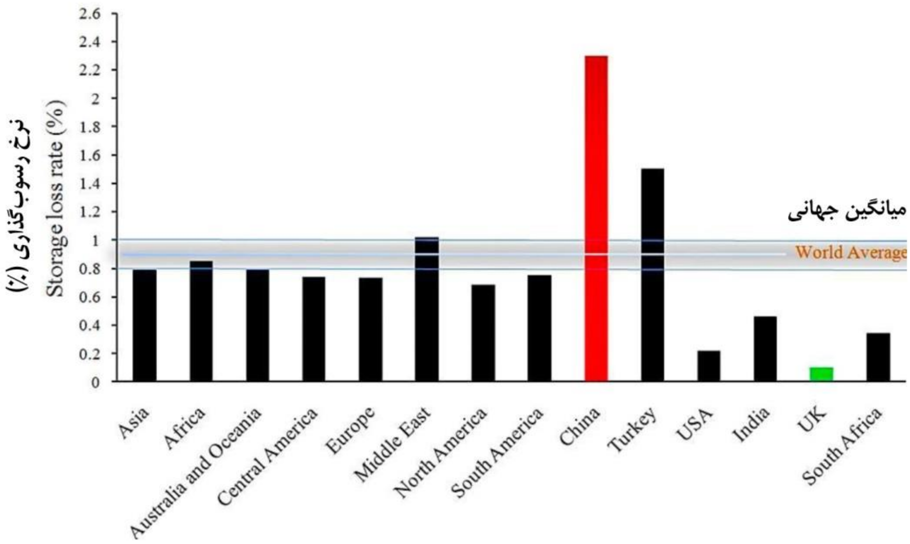
1- https://earthexplorer.usgs.gov/

2- https://www.icold-cigb.org/



شکل ٤- منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان در زمان شروع بهره‌برداری، سال ۱۳۹۳

Figure 4- Original Elevation-area-volume curve of negarestan reservoir dam at start time, 2015



شکل ۵- نمودار مقایسه نتایج میانگین نرخ رسوب‌گذاری سالانه مخازن کشورهای مختلف

Figure 5- Chart comparing the average annual sedimentation rate of reservoirs in different countries

رابطه ۱ نحوه محاسبه این شاخص را با استفاده از باندهای طیفی مرئی‌سبز و مادون‌قرمز نزدیک بیان می‌کند:

$$NDWI_{MCFeeters} = \frac{\mathrm{GREEN} - \mathrm{NIR}}{\mathrm{GREEN} + \mathrm{NIR}} \qquad (۱)$$

شاخص $NDWI_{Gao}$ نیز برای تشخیص مناطق مرطوب اولین‌بار در سال ۱۹۹۴ ارائه شد و از آن برای تشخیص رطوبت مناطق با پوشش‌های گیاهی استفاده شد. نام دیگر این شاخص NDMI است که از کاربردهای آن می‌توان به‌بررسی وجود آب در برگ‌های گیاهان نیز اشاره کرد. مطابق رابطه ۲ این شاخص با استفاده از باندهای مادون‌قرمز نزدیک و کوتاه محاسبه می‌شود (Gao & Goetz,

:(1994

$$NDWI_{Gao} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWRI_1}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWRI_2}} \quad (۲)$$

شاخص MNDWI بهبودیافته شاخص NDWI می‌باشد (Xu, 2006) که در آن باند SWIR1 جایگزین باند NIR شده است و بازه تغییرات آن بین ۱- تا ۱+ می‌باشد. عدد صفر می‌تواند آستانه مناسبی برای تعیین مرز بین آب و خشکی باشد ولی همیشه بهترین آستانه نیست. فرم ریاضی این شاخص با رابطه ۳ بیان شده است:

$$MNDWI = \frac{\mathrm{GREEN} - \mathrm{SWRI_1}}{\mathrm{GREEN} + \mathrm{SWRI_2}} \quad (۳)$$

شاخص $AWEI_{sh}$ برای مناطق سایه‌دار شبیه شاخص $AWEI_{nsh}$ عمل می‌کند با این تفاوت که برای مناطق تیره وسیع مثل سایه در دره‌ها بهتر عمل می‌کند و علاوه بر باندهای استفاده شده در شاخص $AWEI_{nsh}$ باند آبی هم به آن اضافه شده و وزن شاخص‌ها تغییر پیدا کرده است (Feyisa *et al*., 2014). فرم ریاضی این شاخص در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (۴)$$

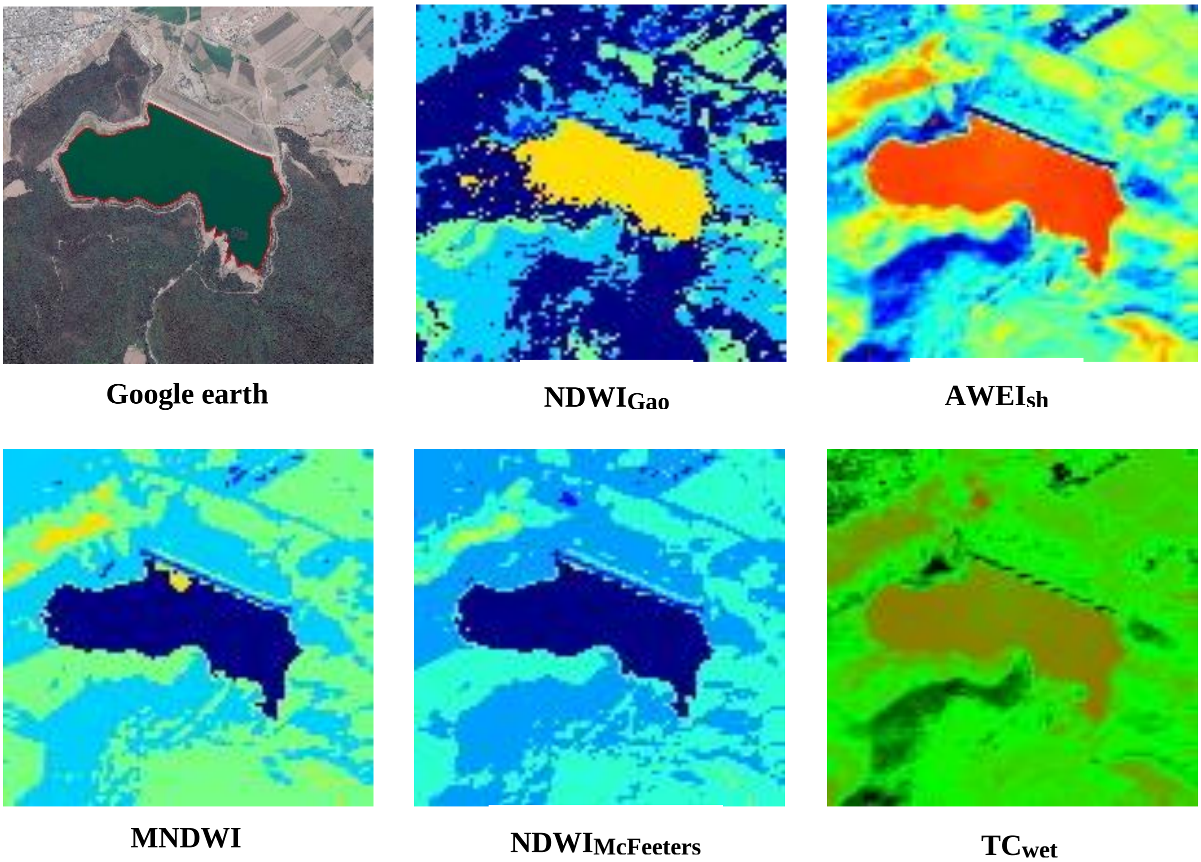
$$TC_{wet} = 0.1509 \times Blue + 0.1973 \times Green + 0.3273 \times Red + 0.3406 \times NIR - 0.7112 \times SWIR1 - 0.4572 \times SWIR2 \quad (۵)$$

شاخص Tasseled Cap Wetness (TC_{Wet}) با استفاده از ۶ باند طیفی و وزن دادن به هرکدام محاسبه شده‌است که شامل سه نوع مختلف روشنایی، پوشش گیاهی و مناطق مرطوب می‌باشد (Crist, 1985) که در این روش از نوع شاخص مناطق مرطوب برای تشخیص پهنه آب‌های سطحی طبق رابطه ۵ استفاده شده است:

شاخص‌های طیفی در روابط ۱ تا ۵ می‌توانند به تنهایی محدوده آب داخل مخزن را تا حد قابل قبولی مشخص کنند، اما برای یک تخمین دقیق از مساحت گستره‌آب مخزن در هر زمان دلخواه، نیاز است که دقت شاخص‌ها و ترکیب آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این‌منظور تصویر مخزن سد نگارستان در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ کمی پس از شروع بهره‌برداری (عدم رسوب‌گذاری در کف مخزن) دانلود شد تا نتایج به‌دست آمده از محاسبه مساحت سطح آب آن با آمار ثبت‌شده توسط اداره آب منطقه‌ای گلستان مقایسه و مورد ارزیابی قرار گیرد. مطابق گزارش آب منطقه‌ای گلستان و نمودار سطح–ارتفاع اولیه مخزن (شکل ۴)، در تاریخ مورد مطالعه تراز سطح‌آب و مساحت سطح‌آب مخزن به‌ترتیب ۱۸۲/۶۳ متر و ۱/۳۳ کیلومتر مربع ثبت و گزارش شده است. تصویر موردمطالعه از پایگاه USGS و به‌فرمت Level2 Collection2 که به‌صورت پیش‌فرض تصحیحات‌اتمسفری بر آن اعمال شده، دانلود و در نرم‌افزار Envi5.3 مورد تصحیحات رادیومتریکی قرار گرفت. سپس یک Layer stack متشکل از ترکیب باندهای‌طیفی مورد نیاز برای محاسبه شاخص‌های‌طیفی آبی ساخته‌شد و با استفاده از روابط ۱ تا ۵ عملیات Band math بر روی تصویر انجام شد. شکل ۶ تصاویر پردازش‌شده برای هر شاخص‌طیفی را در مقایسه با تصویر واقعی دانلودشده از گوگل‌ارث برای مخزن سد نگارستان نشان داده است.

هر تصویر موردمطالعه در محدوده مخزن سد شامل ۲۱۲۶ پیکسل ۳۰×۳۰ متر ماهواره Landsat8 است که مساحت حداکثری برابر با ۱/۹۱ کیلومتر مربع را تشکیل می‌دهد. این مساحت متناظر با حداکثر تراز سطح آب ۱۹۴ متر می‌باشد (مطابق شکل ۴) که از تراز تاج سرریز سد (۱۹۲/۲۵ متر مطابق گزارش آب‌منطقه‌ای گلستان) بالاتر بوده و در عمل اتفاق نخواهد افتاد. برای محاسبه مساحت سطح آب ابتدا پیکسل‌های تصویر برای شاخص‌های ارائه‌شده از کم‌ترین تا بیش‌ترین مقدار در نمودار تجمعی خود مرتب می‌شوند و در شاخص MNDWI شماره پیکسلی که مقدار آن برابر صفر باشد به‌عنوان پیکسل آستانه اولیه بین مناطق آب‌وخشکی در نظر گرفته‌می‌شود، سپس دودرصد از تعداد پیکسل‌ها به‌صورت ۱- تا ۱+ درصد نسبت به پیکسل آستانه اولیه به‌عنوان محدوده اطمینان برای جلوگیری از خطاهای احتمالی سنجنده در ارسال اطلاعات انتخاب می‌شوند و به نمودار فراوانی داده‌های هر شاخص انتقال می‌یابند تا با میانگین‌گیری در این بازه مقدار نهایی‌آستانه آب‌وخشکی برای شاخص مورد نظر مشخص شود. شماره پیکسلی که مقدار آن برابر با میانگین به‌دست آمده در محدوده اطمینان باشد به‌عنوان پیکسل آستانه‌نهایی برای شاخص مورد نظر انتخاب می‌شود و این روند برای تمام شاخص‌های‌طیفی موردمطالعه صورت می‌گیرد تا پنج پیکسل آستانه بین مناطق آب‌وخشکی تعیین گردد. با محاسبه مجموع مساحت پیکسل‌هایی که آب تشخیص داده می‌شوند مساحت به‌دست آمده به‌کمک هر شاخص‌طیفی تخمین زده‌می‌شود. با این روش بهترین آستانه برای تفکیک مناطق آب‌وخشکی حتی برای روزهای ابری و یا مناطق با سایه‌های وسیع محاسبه می‌شود که پیش‌تر به‌صورت کامل توضیح داده شده‌است و در اینجا به بیان خلاصه‌ای از آن اکتفا شد (Feizabady *et al*., 2024).

در جدول ۱ نتایج محاسبه مساحت سطح آب برای مخزن سد نگارستان در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ با استفاده از پنج شاخص‌طیفی آبی ارائه‌شده نشان داده شده است.



شکل ٦- تفکیک مناطق آب‌وخشکی در محدوده سد نگارستان با استفاده از شاخص‌های طیفی

Figure 6. Separation Land-water masks in region of Negarestan reservoir using spectral water indices.

جدول ۱- مقادیر سطح آب و خطای محاسبات در محدوده سد نگارستان با استفاده از شاخص‌های‌طیفی آبی، ۱۳۹۳/۱۰/۲۱

Table 1- Water surface areas and calculating errors of Negarestan reservoir using spectral indices, 2015/01/11

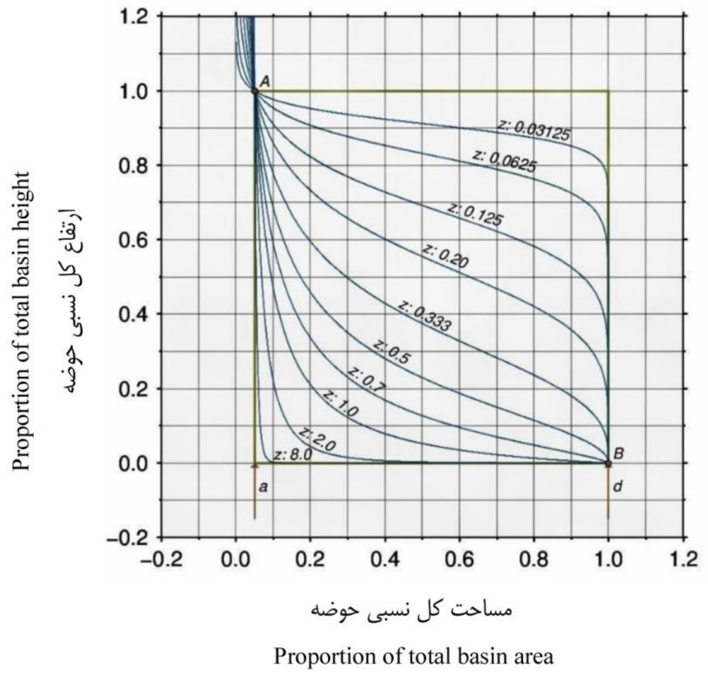
	TC_{Wet}	$AWEI_{Sh}$	MNDWI	$NDWI_{Gao}$	$NDWI_{MCFeeters}$
پیکسل آستانه‌نهایی Final threshold pixel	770	782	758	903	772
سطح آب Water surface area (km^2)	1.22	1.21	1.23	1.10	1.22
سطح خشکی Land area (km^2)	0.69	0.70	0.68	0.81	0.69
خطای محاسبه سطح (٪) Area calculate error (%)	8	9	7	9	8

مطابق نتایج به‌دست آمده در جدول ۱، بین شاخص‌های‌طیفی ارائه‌شده، شاخص MNDWI در محاسبه سطح آب دقت بیشتری دارد و خطای آن در حدود ۷ درصد می‌باشد. همچنین نتایج محاسبه سطوح‌آب برای ۶ تصویر ماهواره‌ای‌مختلف دیگر (نزدیک به‌زمان شروع بهره‌برداری مخزن) ارزیابی و با منحنی حجم-سطح-ارتفاع اولیه مقایسه شد که براساس نتایج به‌دست آمده به‌منظور ترسیم منحنی سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان، از شاخص‌طیفی MNDWI با میانگین خطای حدود ۵ درصد در محاسبه سطوح‌آب استفاده شد. بنابراین ۱۰ تصویر از مخزن نگارستان در بازه زمانی ابتدای سال ۱۳۹۹ تا انتهای ۱۴۰۲ به‌شکلی که محدوده ترازهای سطح آب، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مشاهداتی را پوشش دهند و در این بازه توزیع تقریبا یکنواختی داشته‌باشند دانلود شدند و مطابق با

روش بیان‌شده تعیین سطح آب در آن‌ها انجام شد تا به‌عنوان نقاط واسنجی در ترسیم منحنی هیپسومتری مخزن استفاده شوند. منحنی هیپسومتریک نموداری است که با رسم مساحت‌نسبی در برابر ارتفاع‌نسبی، نسبت مساحت پدیده‌ها را در ارتفاعات مختلف نشان می‌دهد (Strahler, 1952). هر دریاچه یا مخزن دارای یک رابطه سطح–ارتفاع مشخص است که تغییرات آن به تغییرات توپوگرافی مخزن بستگی دارد (Schwatke *et al*., 2020). در مطالعات قبلی برای ترسیم منحنی سطح–ارتفاع مخزن از توابع خطی و چندجمله‌ای استفاده شده است که نمی‌توانند تمام تغییرات سطح–ارتفاع ناشی از تغییرات توپوگرافی را به‌خوبی نشان دهند. باتوجه به توپوگرافی کف‌وجانبی مخزن یک تابع هیپسومتریک باید به‌طور یکنواخت در حال افزایش باشد (Duan & Bastiaanssen., 2013 ; Arsen *et al*., 2013). در سال ۱۹۵۲ استرالر یک منحنی هیپسومتری ترسیم کرد که سطح مقطع افقی یک حوضه‌زهکشی را به ارتفاع آب بالای دهانه آن مرتبط می‌ساخت و برای تحلیل فرسایش توپوگرافی حوزه‌ها مورد استفاده قرار گرفت (Schwatke *et al*., 2020). استرالر برای تطبیق بهترین منحنی هیپسومتریک از یک رابطه با سه متغیر (a, d, z) استفاده کرد (رابطه ۶). در رابطه ۶، متغیر X نشان‌دهنده مساحت نرمال‌شده حوضه و متغیر Y نشان‌دهنده ارتفاع نرمال‌شده حوضه می‌باشند.

$$Y = \left[\frac{d-x}{x} \times \frac{a}{d-a}\right]^{z} \qquad (۶)$$

رابطه اصلی استرالر (رابطه ۶) بر اساس دو عدد ثابت a و d که در آن $d > a$ و $z > 0$ باشد برقرار است. تمام توابعی که برای توان‌های مختلف z نوشته می‌شوند نقاط A(a,1) و B(d,0) را مطابق شکل ۷ قطع می‌کنند. بنابراین بازه تغییرات متغیرهای محور Y و X به‌ترتیب بین (0,1) و (a,d) خواهد بود. شکل ۷ منحنی هیپسومتریک بر پایه رابطه اصلی استرالر برای توان‌های مختلف z و همچنین مقادیر a و d به‌ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۱ را نشان داده است.



شکل ۷- منحنی هیپسومتری با رابطه استرالر اصلی

Figure 7- Hypsometric curve using original Strahler approach

روش اصلی استرالر که به آن اشاره‌شد می‌تواند برای تجزیه‌وتحلیل همه حوضه‌های زهکشی که در آن‌ها مساحت و ارتفاع حداقل‌وحداکثر مشخص است استفاده شود. به‌طور کلی می‌توان فرض کرد که توپوگرافی دریاچه‌ها و مخازن دارای ویژگی‌هایی مشابه حوضه‌های زهکشی است، با این تفاوت که در مطالعه ما ممکن است مساحت سطح آب حداقل و حداکثر مشخص نباشد. دلیل آن‌هم این است که در بازه زمانی موردمطالعه در هیچ‌زمانی مخزن خالی از آب نشده و همچنین رویدادهای شدید مثل سیلاب‌ها اتفاق نیفتاده‌است تا تراز سطح آب مخزن به‌حداکثر مقدار خود برسد. بنابراین روش استرالر مطابق رابطه ۷ برای تخمین منحنی هیپسومتریک مخزن اصلاح شد

تا بتواند نقاط ابتدایی و انتهایی بازه مورد نظر را پوشش دهد.

$$Y = \left[\frac{(x_{min} - x)}{(x_{min} - x_{ip})} \times \frac{(x_{max} - x_{ip})}{(x_{max} - x)}\right]^{z} \times Y_{Scale} + Y_{min} \quad (۷)$$

رابطه ۷ دارای ۶ پارامتر است که در آن X_{max} و X_{min} به‌ترتیب مساحت حداکثر و حداقل منحنی هیپسومتری می‌باشند و مقدار آن‌ها می‌تواند بین ۰ تا مساحت سطح آب حداکثر در زمان پر بودن مخزن تغییر کند. حداقل تراز سطح آب مشاهداتی برابر با Y_{min} و تغییرات عمق آب برابر با Y_{scale} می‌باشد. در این رابطه نمای z فرم کلی منحنی را نشان می‌دهد و مقدار آن با واسنجی‌کردن رابطه ۷ و با استفاده از نتایج تخمین مساحت سطح آب به‌کمک شاخص MNDWI محاسبه می‌شود. X_{ip} مساحت متناظر با تراز سطح آب Y+Yscale است. بدیهی‌است که هر چه مقدار مساحت مشاهداتی متناظر با تراز سطح آب Y_{min} به‌صفر نزدیک‌تر باشد ($X_{min} = 0$) نتایج محاسبات با دقت بیش‌تری به‌دست خواهدآمد. از آن‌جایی که عمق آب مخازن به‌راحتی قابل تشخیص نیست باید یک‌فرض مناسب تا حد امکان دقیق برای Y_{min} در نظر گرفته‌شود تا بتوان ظرفیت ذخیره مخزن را بین کف و پایین‌ترین تراز سطح آب مشاهداتی با دقت بیش‌تری تخمین زد. به‌منظور حل این مشکل ابتدا منحنی هیپسومتریک برای مساحت‌های محاسباتی ترسیم‌شد و با استفاده از چندجمله‌ای توانی و در نظرگرفتن این نکته که منحنی هیپسومتریک باید به‌طور یکنواخت افزایش یابد تراز سطح آب متناظر با مساحت صفر تخمین زده‌شد و در نهایت این نقطه به‌عنوان شروع منحنی هیپسومتریک در نظر گرفته‌شد.

محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن

با برازش منحنی هیپسومتریک می‌توان برای هر سطح آب دلخواه تراز سطح آب متناظر با آن‌را به‌دست آورد و با استفاده از رابطه منشوری (Jain *et al.*, 2002) که برای محاسبه حجم آب مخازن بین دو تراز متوالی ارائه شده است می‌توان ظرفیت ذخیره‌سازی جدید مخزن را مطابق رابطه ۸ محاسبه کرد:

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{3}\{(A_1+A_2)+\sqrt{A_1 \times A_2}\} \quad (۸)$$

که در آن ΔV ظرفیت ذخیره مخزن بین دو تراز متوالی (H_1 و H_2) در دو زمان متفاوت، A_1 و A_2 به‌ترتیب مساحت پهنه آب در ترازهای H_1 و H_2، و ΔH اختلاف تراز سطح آب بین دو تراز متوالی H_1 و H_2 می‌باشد. در رابطه منشوری (رابطه ۸) هرچقدر فاصله بین سطح‌های متوالی کم‌تر باشد دقت محاسبات افزایش خواهدیافت (Vidya *et al.*, 2023).

محاسبه نرخ رسوب‌گذاری و عمر مفید مخزن

پس از محاسبه حجم بین ترازهای مختلف آب و به‌دست آوردن ظرفیت ذخیره‌سازی نهایی مخزن، نرخ رسوبگذاری سالانه (SR) در یک دوره زمانی مشخص از رابطه ۹ به‌دست می‌آید (Haregeweyn *et al.*, 2012)، که در آن N تعداد سال‌های دوره مورد نظر و V_1 و V_2 به‌ترتیب ظرفیت ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره می‌باشند:

$$SR_{(year)} = \frac{1}{N}\left(\frac{V_1 - V_2}{V_1}\right) \times 100 \quad (۹)$$

همچنین عمرمفید مخزن برحسب سال مطابق رابطه ارائه‌شده توسط (Haregeweyn *et al.*, 2012) از رابطه ۱۰ قابل محاسبه خواهد بود:

$$LE_{(year)} = \frac{UV}{SR} \quad (۱۰)$$

در این رابطه LE عمرمفید مخزن به سال، UV ظرفیت مفید باقی‌مانده مخزن برحسب درصد (مطابق نتایج به‌دست آمده در این مطالعه) و SR نرخ رسوب‌گذاری سالانه می‌باشد.

نتایج و بحث

با توجه به ترازهای گزارش‌شده توسط آب‌منطقه‌ای گلستان از انتهای سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۰۳ ده‌تصویر از مخزن سد نگارستان برای واسنجی‌کردن منحنی هیپسومتری دانلود و تعیین سطح آب در آن‌ها انجام‌شد که در جدول ۲ مقادیر به‌دست آمده ارائه شده است.

تاریخ‌های انتخاب‌شده در جدول ۲ به شکلی در نظر گرفته‌شدند که علاوه‌بر ایجاد یک بازه تغییرات عمق‌آب حداکثری، توزیع تقریبا یکنواختی بین کم‌ترین و بیش‌ترین عمق آب مشاهداتی داشته‌باشند تا در ترسیم منحنی هیپسومتری دقت بالاتری به‌دست آید. همچنین سعی شد تاریخ تصاویر انتخابی به زمان حاضر نزدیک‌تر باشد تا در بازه زمانی مورد ارزیابی، اثرات رسوب‌گذاری بر توپوگرافی کف‌مخزن نسبت به گذشت زمان کاهش یابد. با این‌حال محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. برای ترسیم منحنی هیپسومتری استرالر اصلاح‌شده ترازهای‌سطح آب مشاهداتی و مساحت‌های محاسبه‌شده به‌عنوان نقاط کالیبراسیون در نظر گرفته‌شدند و با استفاده از رابطه ۷ منحنی هیپسومتریک برای مقادیر مختلف نمایی z ترسیم شد تا نزدیک‌ترین منحنی به مقادیر واقعی به‌دست آید. شکل ۹ منحنی‌های هیپسومتریک مخزن سد نگارستان را برای مقادیر مختلف z نشان داده است.

در شکل ۹ نقاط واسنجی برای کمک به‌انتخاب بهترین نمای z که بتواند منحنی هیپسومتری بهینه را برازش دهد نشان داده شده است. نتایج نشان داد z برابر با ۰/۶۵ می‌تواند بهترین نما برای رابطه استرالر اصلاح‌شده (رابطه ۷) باشد. مطابق آن‌چه پیش‌بینی شد منحنی هیپسومتریک بهینه به‌طور یکنواخت روند صعودی دارد.



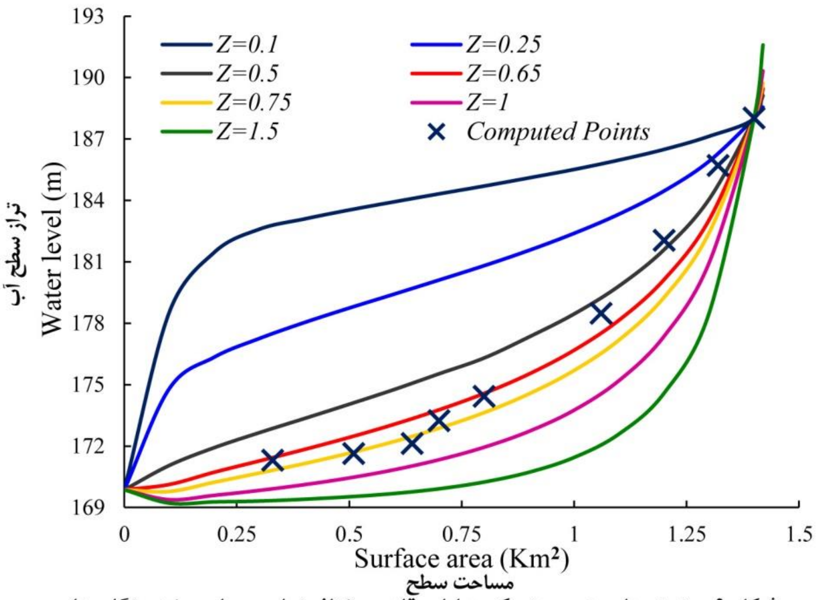
شکل ۸- فلوچارت مراحل انجام فرآیند تخمین نرخ رسوب‌گذاری مخزن

Figure 8- Flowchart of applied processing steps of estimating sedimentation rate of reservoir

جدول ۲- نتایج محاسبه مساحت سطح آب بااستفاده از شاخص MNDWI برای مخزن نگارستان

Table 2- The results of computed water surface areas using MNDWI index of Negarestan reservoir.

تاریخ Date	تراز سطح آب Water level (m)	مساحت محاسبه‌شده Computed Surface area (Km^2)	مساحت اولیه Original surface area (Km^2)
2018.06.11	188.00	1.40	1.60
2020.01.28	171.62	0.51	0.56
2020.10.14	173.22	0.70	0.75
2021.09.23	171.29	0.33	0.56
2022.03.30	182.03	1.17	1.30
2022.07.17	178.47	1.06	1.10
2022.08.25	174.41	0.79	0.81
2022.10.05	171.69	0.64	0.57
2023.04.30	185.69	1.32	1.77
2024.02.15	175.60	0.89	0.94



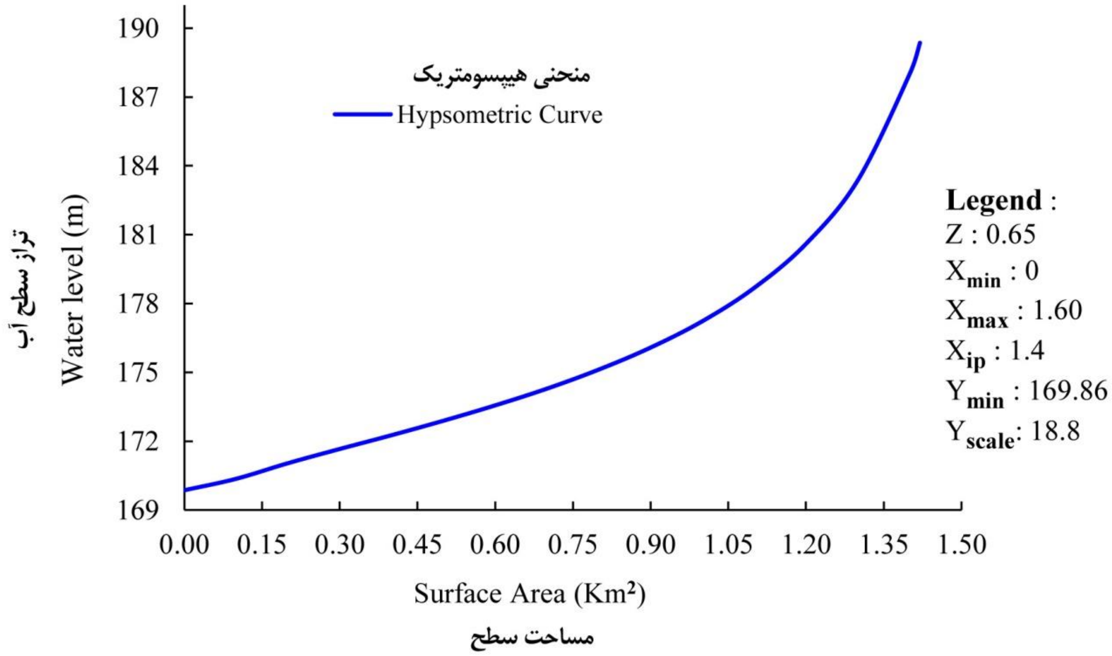
شکل ۹- منحنی‌های هیپسومتریک به ازاء مقادیر مختلف نمای z برای مخزن نگارستان

Figure 9– Hypsometric curves of Negarestan reservoir for different exponent z

مطابق منحنی هیپسومتریک (شکل ۱۰) نقاط تقاطع کم‌ترین (صفر) و بیش‌ترین (۱/۴۲ کیلومترمربع) مساحت محاسبه‌شده با ترازهای سطح آب به ترتیب ۱۶۹/۸۶ و ۱۸۹/۴۷ متر می‌باشد. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد در صورتی‌که مقادیر z افزایش‌یابد، سطح زیر منحنی هیپسومتریک کاهش پیدا می‌کند که نتیجه آن کاهش ظرفیت ذخیره‌مخزن خواهد بود. بنابراین انتخاب مناسب نمای z مسئله‌ای مهم در ترسیم این منحنی است. شکل ۱۰ منحنی هیپسومتریک استرالر اصلاح‌شده با z برابر ۰/۶۵ را برای نتایج مساحت‌های سطح آب به‌دست آمده به‌کمک شاخص MNDWI نشان داده است.

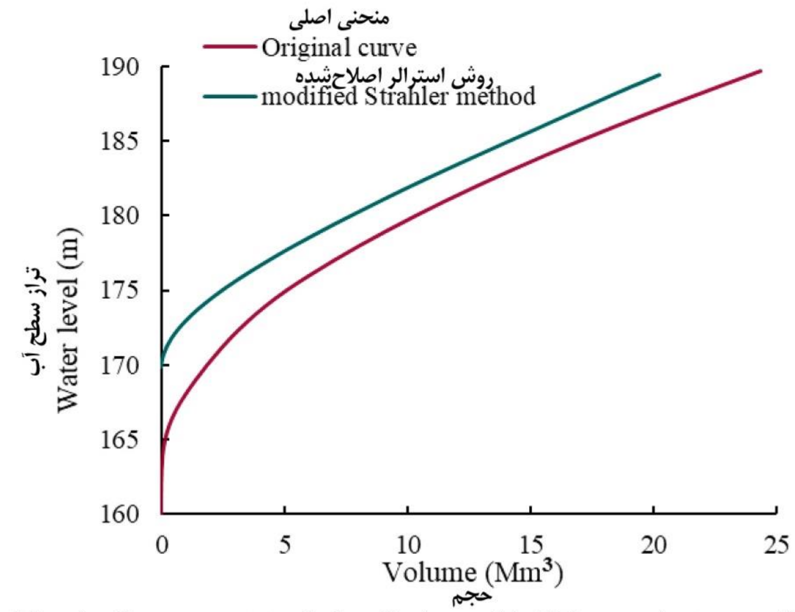
با برازش منحنی هیپسومتریک نهایی مخزن (شکل ۱۰) می‌توان در هر سطح آب دلخواه تراز آب متناظر با آن‌را با دقت بالایی محاسبه کرد. مزیت اصلی این منحنی نسبت به‌منحنی چندجمله‌ای، پیش‌بینی دقیق حداکثر و حداقل سطح آب مخزن در زمانی است که بازه تغییرات داده‌های مشاهداتی بین کم‌ترین و بیش‌ترین تراز سطح آب محدود باشد، برای مثال سطح آب مخزن کاهش یا افزایش قابل‌توجهی بر اثر عواملی مثل خشکسالی‌ها و یا سیلاب‌ها نداشته باشد. همچنین این منحنی به‌کمک نماهای z متفاوت این امکان را می‌دهد که بتوان با دقت قابل‌قبولی رابطه‌ای مناسب بین مقادیر واقعی و محاسباتی برقرار کرد. برای محاسبه ظرفیت ذخیره مخزن به‌کمک منحنی هیپسومتریک، ترازهای سطح آب بین تراز کمینه و بیشینه ۱۶۹/۸۶ تا ۱۸۹/۴۷ متر به فاصله‌های متوالی ۰/۵ متری انتخاب شدند و مساحت‌های متناظر با آن‌ها از روی نمودار سطح-ارتفاع جدید محاسبه و نتایج در رابطه محاسبه حجم آب منشوری (رابطه ۸) جای‌گذاری شدند. شکل ۱۱ منحنی حجم-ارتفاع به‌دست آمده از رابطه منشوری و اولیه مخزن نگارستان را در بازه‌زمانی ۹ ساله نشان داده است.

باتوجه به شکل ۱۱ حجم رسوب انباشته‌شده در مخزن از اختلاف منحنی محاسباتی و اولیه‌مخزن در زمان شروع بهره‌برداری قابل محاسبه است. منحنی محاسباتی حجم-ارتفاع مخزن نشان می‌دهد که در تراز حدود ۱۷۰ متر ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن به صفر رسیده‌است. در حالی‌که منحنی اولیه مخزن تراز متناظر با حجم آب ذخیره‌شده صفر یا خالی‌بودن مخزن را برابر ۱۶۰ متر در سال ۱۳۹۳ گزارش می‌کند. به‌کمک رابطه منشوری و شکل ۱۱ می‌توان مقدار ظرفیت ذخیره از دست‌رفته مخزن بین دو تراز سطح آب دلخواه متوالی را نیز محاسبه کرد. مطابق با داده‌های منحنی اولیه آب‌منطقه‌ای گلستان (شکل ۴)، ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن بین تراز ۱۶۰ (تراز کف اولیه مخزن) و تراز ۱۸۹/۴۷ متر (تراز سرریز) حدود ۲۳/۹۰ میلیون‌متر مکعب گزارش شده است که براساس نتایج به‌دست آمده از روش‌پیشنهادی (شکل ۱۱) این ظرفیت در پایان سال ۱۴۰۲ به‌حدود ۲۰/۲۵ میلیون‌متر مکعب کاهش یافته است. بااستفاده از رابطه ارائه‌شده برای محاسبه نرخ رسوب‌گذاری در مخازن (رابطه ۹) نرخ رسوب‌گذاری سالانه مخزن سد نگارستان از انتهای سال ۱۳۹۳ تا انتهای سال ۱۴۰۲ حدود ۱/۶ درصد محاسبه‌شد. نرخ رسوب‌گذاری به‌دست آمده بیان می‌کند که مخزن سد نگارستان به‌طور میانگین، سالانه حدود ۱/۶ درصد از ظرفیت ذخیره‌سازی آب خود را بر اثر ته‌نشینی رسوبات از دست می‌دهد.



شکل ۱۰- منحنی هیپسومتریک نهایی مخزن نگارستان در z برابر با ۰/۶۵

Figure 10– Final hypsometric curve of Negarestan reservoir in z= 0.65



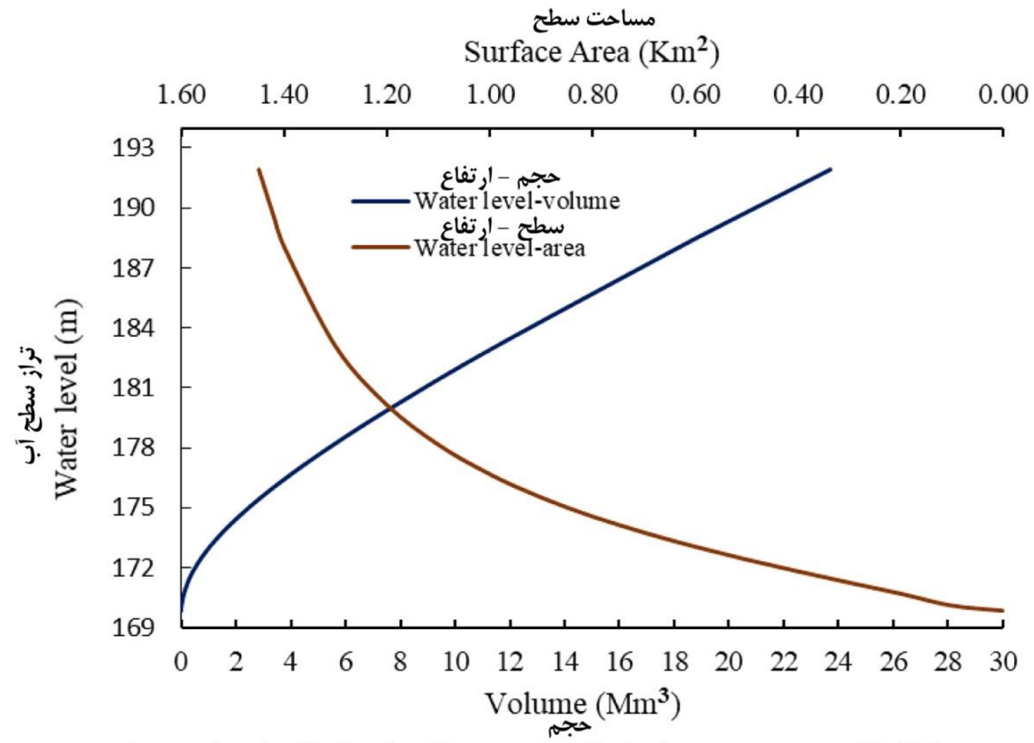
شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های حجم-ارتفاع اولیه و محاسباتی به‌کمک منحنی هیپسومتریک مخزن نگارستان، بازه ۹ ساله

Figure 11- Comparing of original and computed hypsometric method water level-volume curves of Negarestan reservoir, at 9 years' time range

بنابراین عمر مفید مخزن با استفاده از رابطه ۱۰ حدود ۵۳ سال به‌دست آمد. بر این اساس مطابق نتایج به‌دست آمده مخزن سد نگارستان تا سال ۱۴۲۵ حدود نیمی از ظرفیت ذخیره‌سازی خود را از دست خواهدداد. در تخمین عمر مفید مخزن فرض بر این‌است که

شـــرایط اقلیمی در آینده تغییر چندانی نکند. ولی در صـــورت وقوع پدیده‌هایی مثل سـیلاب‌ها، خشـکسـالی‌ها و یا تغییر در نحوه کاربری اراضی در بالادست مخزن و نحوه مدیریت آبخیزداری عمرمفید مخزن می‌تواند از مقدار پیش‌بینی شـــده کمتر باشـــد. باتوجه به شـــکل ۵، کمیســـیون بین‌المللی مخـازن بزرگ (ICOLD) کـه بـه‌بررســـی و جمع‌آوری اطلاعات حدود ۶۲۰۰۰ مخزن در سراسر جهان پرداخته‌است طبق گزارشی در سال ۲۰۱۹ متوسط نرخ رسوب‌گذاری مخازن جهان را حدود ۰/۹۶ درصـــد برآورد کرده‌اســـت (Madadi, 2022). این کمیسیون همچنین نرخ متوسط رسوب‌گذاری در مخازن آسیا را حدود ۰/۸۰ درصد گزارش کرده‌است (شکل ۵).

محاسـبات نرخ رسـوب‌گذاری مخزن سـد نگارسـتان با اسـتفاده از روش پیشـنهادی (محاسـبه سـطح آب اسـترالر اصـلاح‌شـده) و همچنین تخمین ظرفیت ذخیره مخزن با رابطه منشـوری نشـان داد که متوسـط نرخ رسـوب‌گذاری سـالانه مخزن نگارسـتان حدود ۱/۶ درصـد می‌باشد که در مقایسـه با متوسـط جهانی و آسـیا به‌ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۸ درصـد بیش‌تر اسـت. مطابق این گزارش تنها کشـورهای چین و ترکیه دارای نرخ متوسط رسوب‌گذاری بیشتری نسبت به سد نگارستان می‌باشند. هم‌چنین گزارش‌ها نشـــان می‌دهد نرخ رســـوب‌گذاری مخـازن در کشورهای توسعه‌یافته که عملیات آبخیزداری در آن‌ها به‌شکل مناسبی انجام می‌شود سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد می‌باشد (Niykadzino *et al.*, 2021). در مخازن ایران نرخ متوسـط رسـوب‌گذاری کمتر از یک درصـد و بین حدود ۰/۵۵ تا ۰/۷۵ درصـد سـالانه گزارش شـده‌اسـت (Imanshoar *et al.*, 2009). با بررســـی و ارزیابی نتایج ســـایر پژوهش‌ها مشـخص می‌شـود که مخزن سـد نگارسـتان از نظر نرخ رســوب‌گذاری مقداری بیش از متوســط اکثر مخازن در نقاط مختلف جهـان دارد و این‌مقـدار بین ۱/۵ تـا ۲ برابر متغیر می‌بـاشـــد. در پژوهش‌های گذشته برای ترسیم منحنی سطح-ارتفاع مخازن از توابع خطی یا چندجمله‌ای استفاده شده‌است، در این پژوهش روشی مبتنی بر ایجاد یک منحنی هیپسومتریک که می‌تواند نقاط ابتدایی و انتهایی بازه در کم‌ترین و بیشترین تراز سطح آب را تخمین بزند و به ازاء نقاط کالیبراسیون ثابت چندین منحنی هیپسومتری برای مخزن ترسیم کند تا با مقایسه این منحنی‌ها بتوان منحنی سطح-ارتفاع بهینه مخزن را انتخاب کرد ارائه شد. در شکل ۱۲ منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن نگارســـتان بااســـتفاده از مســـاحت‌ها و ترازهای ســـطح آب منحنی هیپســـومتریک و رابطه منشـــوری، برای مقایســـه با منحنی اولیه آب‌منطقه‌ای گلستان (شکل ۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان بااستفاده از روش‌پیشنهادی

Figure 12- Water level-area-volume of Negarestan reservoir using suggested method

مهم‌ترین تفاوت منحنی شکل ۱۲ با منحنی اولیه‌مخزن در زمان بهره‌برداری نقطه شروع منحنی حجم-ارتفاع در تراز سطح آب ۱۶۹/۸۶ متر است که نشان می‌دهد بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ متوسط عمق‌وحجم رسوب‌گذاری در مخزن تا این تراز به‌ترتیب حدود ۱۰ متر و ۲ میلیون‌متر مکعب بوده است که این حجم از رسوبات معادل ۶۵ درصد حجم کل رسوب انباشته‌شده در مخزن نگارستان می‌باشد. براساس نتایج و ارزیابی‌های صورت‌گرفته می‌توان از منحنی ارائه‌شده در شکل ۱۲ به‌عنوان جایگزین مناسبی برای منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن نگارستان استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان‌داد که به‌دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد، ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سد نگارستان در بازه زمانی ۹ساله از حدود ۲۴ به ۲۰ میلیون متر مکعب کاهش یافته‌است که نرخ رسوب‌گذاری‌سالانه در این بازه‌زمانی حدود ۱/۶درصد به‌دست‌آمد. این مقدار نرخ رسوب‌گذاری حدود ۱/۵ تا ۲ برابر نرخ متوسط رسوب‌گذاری مخازن‌جهان که توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای‌بزرگ (ICOLD) اعلام شده‌است می‌باشد. بر این اساس عمرمفید مخزن سدنگارستان از ابتدای سال ۱۴۰۳ حدود ۵۳ سال برآوردشد و پیش‌بینی می‌شود این مخزن تا سال ۱۴۲۵ حدود نیمی از ظرفیت‌ذخیره‌سازی اولیه خود را از دست می‌دهد. بررسی‌ها و نتایج روش‌پیشنهادی نشان‌داد که سنجش‌ازدور می‌تواند ضمن صرف کم‌ترین هزینه و در زمان کم، نتایج قابل‌توجهی از مساحت گستره‌های‌آبی، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن، نرخ رسوب‌گذاری و برآورد عمر مفید مخازن ارائه کند.

در کشور ایران سالانه بودجه قابل توجهی توسط سازمان‌های ذیربط برای تعیین حجم رسوب انباشته‌شده در مخازن سدها تخصیص داده می‌شود. بنابراین استفاده از علوم نوین برای افزایش دقت نتایج، کاهش هزینه‌ها و کاهش خطرات جانی در حین انجام عملیات اندازه‌گیری‌های میدانی ضروری است. یکی از مهمترین راهکارها در این زمینه استفاده از علم سنجش‌ازدور یا فناوری ماهواره‌ای است. پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای به‌کارگیری مدل‌های سنجش‌ازدور استفاده کرده‌اند. در این پژوهش از روشی دقیق برای محاسبه مساحت سطوح آب که خطاهای سنجنده در ارسال داده‌ها را کاهش می‌دهد استفاده شد و با محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سد در زمان‌های مختلف، حجم رسوب‌گذاری در مخزن برآورد شد. از محدودیت‌های روش تخمین ظرفیت ذخیره مخزن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان به‌عدم وقوع ترازهای سطح آب کمینه و بیشینه که در زمان سیلاب‌ها و یا خشکسالی‌های متعدد اتفاق می‌افتند اشاره کرد. برای رفع این محدودیت‌ها، در پژوهش حاضر با استفاده از ترسیم منحنی هیپسومتریک ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن در ترازهای سطح آب حداکثر و حداقل با دقت بالایی محاسبه شد. با توجه به ارتباط دریاچه های طبیعی با حفاظت از اکوسیستم و تنوع زیستی، روش پیشنهادی می‌تواند در راستای بررسی نتایج مربوط به اعمال شیوه‌های کاهش فرسایش دریاچه‌های طبیعی نیز که به‌طور گسترده با افزایش قابل توجه نرخ رسوب‌گذاری مواجه هستند، استفاده شود.

به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهبود مدیریت منابع‌آبی، ضمن توصیه کاربرد روش ارائه‌شده در این تحقیق برای مخازن سدهای مهم کشور موارد تکمیلی زیر نیز پیشنهاد می‌شوند:

- بررسی کارایی تصاویر ماهواره‌ای در ارزیابی اثرات اقدامات اصلاحی (انجام عملیات آبخیزداری، احیاء پوشش گیاهی حوضه آبخیز و احداث سدهای رسوبگیر در بالادست سدهای مخزنی) که با هدف کاهش حجم رسوب ورودی به مخزن سد انجام شده است.
- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های مستقیم، به کمک داده‌های جریان و رسوب کافی از مخزن سد و حوضه آبخیز.
- در مواردی که به‌دلیل عدم امکان اندازه‌گیری‌های میدانی اطلاعات مربوط به هیدروگرافی، رسوب‌سنجی و هیدرومتری مخازن در دسترس نیستند می‌توان از روش پیشنهادی با صرف کمترین زمان و هزینه استفاده کرد.
- پیش‌بینی عمر مفید مخزن سدهای کشور به‌منظور ایجاد جایگزینی مناسب برای تامین ظرفیت ذخیره‌سازی آب مورد نیاز، زمانی که مخزن سد به‌دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد غیرقابل استفاده خواهد شد.

References

1. Arsen, A., Crétaux, J. F., Berge-Nguyen, M., & Abarca del Rio, R. (2013). Remote sensing-derived bathymetry of Lake Poopó. *Remote Sensing*, *6*(1), 407-420. https://doi.org/10.3390/rs6010407
2. Banasik, K., Hejduk, L., Krajewski, A., & Wasilewicz, M. (2021). The intensity of siltation of a small reservoir in Poland and its relationship to environmental changes. *Catena*, *204*, 105436. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105436
3. Chen, C.Y., McGee, D., Woods, A., Pérez, L., Hatfield, R.G., Edwards, R.L., & Rodbell, D.T. (2020). U-Th dating of lake sediments: Lessons from the 700 ka sediment record of Lake Junín, Peru. *Quaternary Science Reviews*, *244*, 106422. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106422
4. Crist, E.P. (1985). A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of*

Environment, *17*(3), 301-306. https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6
5. Droujko, J., Sudha, S.H., Singer, G., & Molnar, P. (2023). Sediment source and sink identification using Sentinel-2 and (kayak-based) lagrangian river turbidity profiles on the Vjosa River. *EGUsphere*, 1-24. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-156
6. Duan, Z., & Bastiaanssen, W.G.M. (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, *134*, 403-416. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010
7. Feizabady, H., Ghorbani, K., & Zahiri, R. (2024). Monitoring time series of reservoir water surface area changes using remote sensing approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*.
8. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, *140*, 23-35. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.08.029
9. Gao, B.C., & Goetz, A.F. (1994). Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*, *47*(3), 369-374. https://doi.org/doi:10.1016/0034-4257(94)90104-X
10. Ghanbari, R., Tayfehrostami, A., Forouzanfar, M., & Tashakori, M. (2024). Using Optical Satellite Images and Satellite Altimetry Data to Estimate Volume Variations in Dams. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *48*, 189-196. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-189-2024
11. Gonzalez Rodriguez, L., McCallum, A., Kent, D., Rathnayaka, C., & Fairweather, H. (2023). A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. *Aquatic Sciences*, *85*(2), 60. https://doi.org/10.1007/s00027-023-00960-0
12. Gourgouletis, N., Bariamis, G., Anagnostou, M.N., & Baltas, E. (2022). Estimating reservoir storage variations by combining Sentinel-2 and 3 measurements in the Yliki Reservoir, Greece. *Remote Sensing*, *14*(8), 1860. https://doi.org/10.3390/rs14081860
13. Haregeweyn, N., Melesse, B., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Meshesha, D., & Balana, B.B. (2012). Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia). *Journal of Soils and Sediments*, *12*, 291-305. https://doi.org/10.1007/s11368-011-0447-z
14. Imanshoar, F., Hassanzadeh, Y., & Aalami, M.T. (2009). An introduction to environmental impacts of sedimentation and erosion due to dam's construction. In *Workshop on Reservoir Sedimentation Control, Regional Centre on Urban Flood Management, Karaj, Iran*.
15. Jain, S.K., Singh, P., & Seth, S.M. (2002). Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data. *Hydrological Sciences Journal*, *47*(2), 203-212. https://doi.org/10.1080/02626660209492924
16. Kondolf, M., & Yi, J. (2022). Dam renovation to prolong reservoir life and mitigate dam impacts. *Water*, *14*(9), 1464. https://doi.org/10.3390/w14091464
17. Lemma, H., Nyssen, J., Poesen, J., Assaye, H., Adgo, E., & Frankl, A. (2024). Impact of reservoir construction on the sediment budget of a downstream-linked freshwater lake. *Hydrological Sciences Journal*, 1-11. https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2337052
18. Madadi, M.R. (2022). Reservoir sedimentation management: A state-of-the-art review. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, *9*(2), 194-202.
19. McFEETERS, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.3390/rs5073544
20. Nyikadzino, B., & Gwate, O. (2021). Estimation of Reservoir Capacity and Sedimentation Rate Using Direct and Indirect Methods. *International Journal Earth Science Geophysics*, *7*, 045. https://doi.org/10.35840/2631-5033/1845
21. Ren, S., Zhang, B., Wang, W.J., Yuan, Y., & Guo, C. (2021). Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China. *Catena*, *199*, 105096. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105096
22. Schwatke, C., Dettmering, D., & Seitz, F. (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, *12*(10), 1606. https://doi.org/10.3390/rs12101606
23. Sedláček, J., Bábek, O., Grygar, T.M., Lenďáková, Z., Pacina, J., Štojdl, J., & Elznicová, J. (2022). A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs. *Journal of Hydrology*, *605*, 127397. https://doi.org/10.3390/w14213481
24. Sekertekin, A., Abdikan, S., & Marangoz, A.M. (2018). The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*, 1-13. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-018-6767-3
25. Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of Americabulletin*, *63*(11), 1117-1142. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1952GSAB...63.1117S/doi:10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

26. Teixeira Pinto, C., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of Landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote Sensing*, *12*(16), 2597. https://doi.org/10.3390/rs12162597
27. Tesfaye, A.T., Moges, M.A., Moges, M.M., Worqlul, A.W., Defersha, D.T., & Wassie, A.B. (2023). Reservoir sedimentation evaluation using remote sensing and GIS approaches for the reservoirs in the upper Blue Nile Basin. *Sustainable Water Resources Management*, *9*(1), 23. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00792-0
28. Vidya, A., Poompavai, V., & Hebbar, R. (2023). Geospatial techniques for assessment of loss in reservoir storage capacity a case study of tungabhadra reservoir. In *2023 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)* (pp. 1-4). IEEE. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.188
29. Wagh, S., & Manekar, V. (2021). Assessment of reservoir sedimentation using satellite remote sensing technique (SRS). *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, *102*(3), 851-860. https://doi.org/10.1007/s40030-021-00539-8
30. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(14), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179
31. Yao, F., Minear, J.T., Rajagopalan, B., Wang, C., Yang, K., & Livneh, B. (2023). Estimating reservoir emendation rates and storage capacity losses using high-resolution sentinel-2 satellite and water level data. *Geophysical Research Letters, 50*(16), e2023GL103524. https://doi.org/10.1029/2023GL103524
32. Yulianto, F., Kushardono, D., Budhiman, S., Nugroho, G., Chulafak, G.A., Dewi, E.K., & Pambudi, A.I. (2022). Evaluation of the threshold for an improved surface water extraction index using optical remote sensing data. *The Scientific World Journal*, *2022*(1), 4894929. https://doi.org/10.1155/2022/4894929